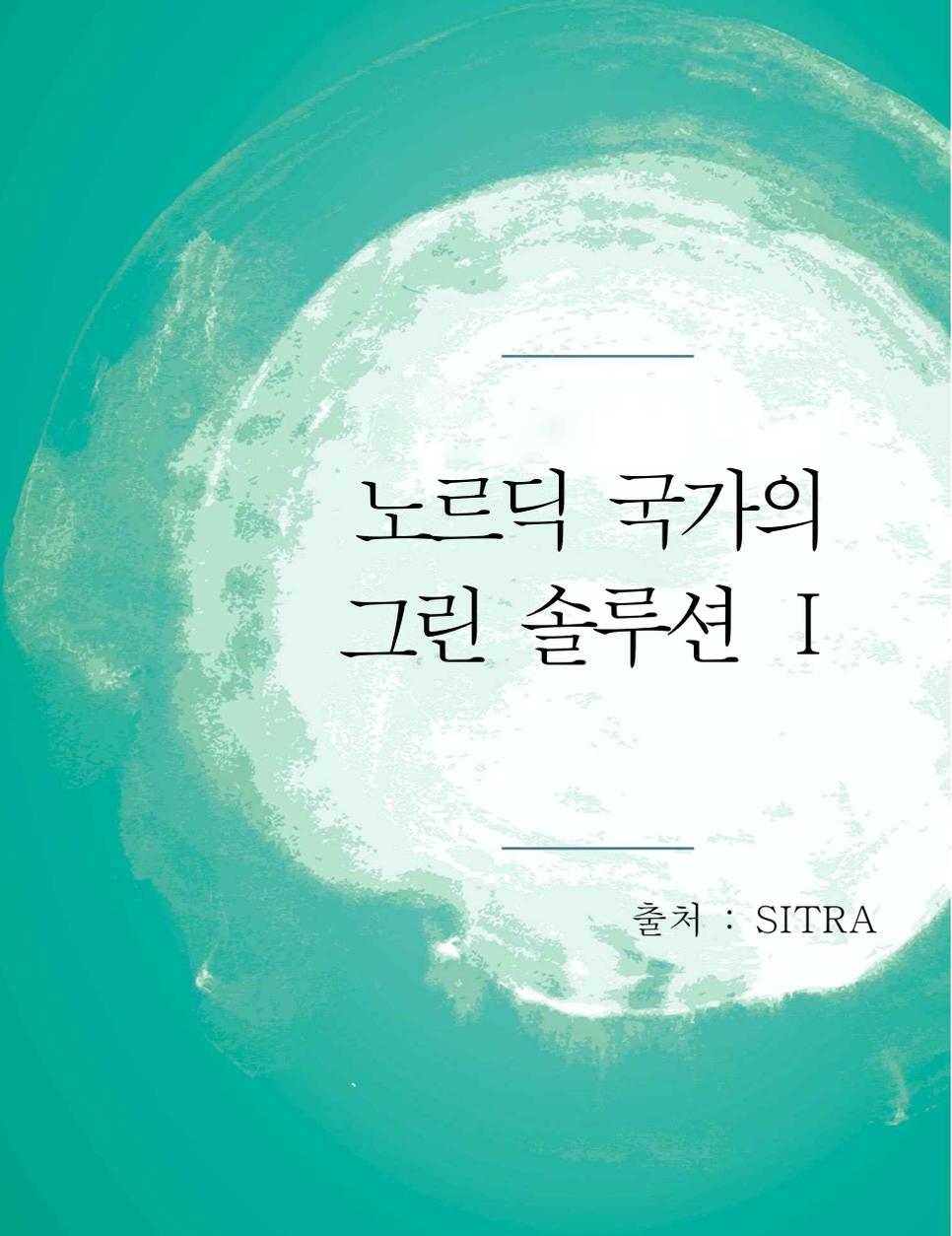


해외보고서 요약

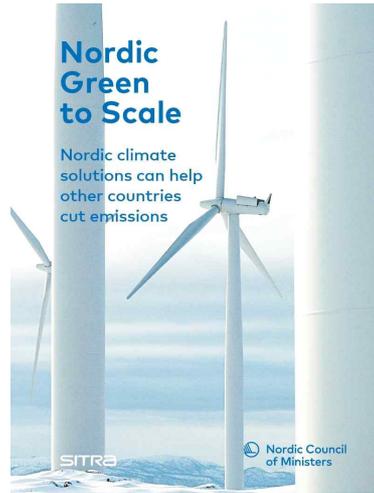


노르딕 국가의  
그린 솔루션 I

출처 : SITRA

## 노르딕 국가의 그린 솔루션 I

- 개요
- 에너지 분야 솔루션
- 산업 분야 솔루션



## ○ 개요

전 세계 공동 목표인 2°C 미만 억제를 달성하기 위해서 개별 국가의 감축 목표 달성을 넘어 그 이상의 노력이 요구되고 있다. 이를 위해 본 노르딕 그린 스케일 프로젝트는 노르딕 지역에서 이미 성과가 증명된 15개의 기후솔루션을 고찰해 봄으로써 다른 국가들의 구체적인 저탄소 노력 이행을 돕고자 한다. 각 솔루션을 전 세계 국가에 스케일업(scale-up)했을 때의 기후영향과 비용을 예측해보고, 혜택 및 여전히 존재하는 장애물에 대해서도 알아보도록 한다.

솔루션 간에 미치는 기후영향은 매우 다양하다. 앞으로 살펴볼 15개의 솔루션을 스케일업했을 때, 2030년의 배출 기대 감축치는 약 4.1GtCO<sub>2</sub> e에 달할 것으로 기대된다. 이는 오늘날 유럽연합의 총 탄소배출치와 동일한 수준이다. 본 연구에서 알아본 노르딕 국가 솔루션의 전 세계 적용은 이미 노르딕 국가에서 달성한 목표보다 그 기대효과가 훨씬 뛰어나다. 현재 환경 정책을 이행하고 있는 국가들은 과거의 경험으로부터 노하우를 얻어 더 빠른 시일 내에 좋은 결과를 얻을 수 있을 것이다. 또한 환경기술 혁신으로까지 이어져 기존의 솔루션 방안들의 보다 효율적이며 효과적인 방향을 제시할 수도 있으며, 완전히 새로운 솔루션을 선보일 수도 있다.

## ○ 에너지 분야 솔루션

### 1) 열 병합 발전

핀란드의 열 병합발전(Combined Heat and Power, CHP)은 산업용 열원의 80%를 차지하고 있다. 덴마크와 핀란드의 도시 건물들은 주로 지역 난방으로 이루어지는데, 이 중 70 ~ 80%가 열병합발전으로 생산되고 있다. 핀란드의 산업용 열병합발전 점유율이 만약 전 세계 펄프, 제지, 화학, 식품 및 목재 산업으로 스케일업된다고 가정한다면 2030년까지 292Mt의 배출 절감이 가능할 것으로 기대된다. 또한 덴마크와 핀란드 지역난방 점유율을 OECD 국가들에 적용한다면 2030년 최대 879Mt까지 탄소 배출을 감축할 수 있다.

Sector	2025	2030
<b>총 산업 분야</b>	<b>179</b>	<b>292</b>
제지 및 펄프	58	95
화학	112	182
식품	8	13
목재 상품	2	3
<b>총 지역난방</b>	<b>563</b> (477-649)	<b>879</b> (746-1,011)
<b>열병합발전(CHP)</b>	<b>742</b> (656-828)	<b>1,171</b> (1,039-1,303)

<표1> 열병합발전을 통한 전 세계 산업 분야별 배출 기대 감축치 (단위 : MtCO<sub>2</sub>e)

열병합발전과 지역난방의 핵심 요소는 인프라에 대한 인센티브이다. 개발자와 도시 계획자가 난방 네트워크, 열병합발전소 및 건설 분야의 협력을 이룬다면 지역난방 네트워크 구축은 상당히 저렴해질 수 있다. 핀란드의 경우, 연료세 면제를 통해 열병합발전을 지원하고 있으며, 각 지방정부 또한 건물들의 지역난방 참여를 요구할 수 있는 권한을 갖는다. 덴마크 또한 지방정부가 각 가구의 지역난방 연결을 지시할 수 있다. 또한 석유나 천연가스같은 타 에너지원으로부터 전환 시 설치비용을 지원한다.

산업 열병합발전 활용 레트로피트 및 건설은 연료 절감을 가능하게 하여 6.6달러/tCO<sub>2</sub> 를 절약할 수 있다. 이를 글로벌 규모로 스케일업할 경우 2030년에는 약 19억 달러의 비용이 감소될 수 있다. 이 뿐 아니라 열병합발전은 대기오염 방지, 수입연료 절약 및 에너지 안보 개선과 같은 혜택을 제공할 수 있다. 한편 산업 열병합발전 및 지역난방 네트워크는 자본집약적이며, 상대적으로 회수기간이 길다는 특징을 지니고 있다. 특히 이자율이 높거나 에너지 비용이 낮을 때 더욱 그러하다.

## 2) 육상풍력

2014년, 스웨덴 풍력 발전은 11TWh, 덴마크는 9.3TWh를 생산하면서 국내 전기 수요량 각각 8%, 25%를 충당했다. 만약 다른 국가들이 스웨덴과 덴마크의 풍력발전 기술의 동일 점유율에 도달한다면 2030년 2,400TWh의 전기를

생산할 수 있다. 만약 전 세계 국가별 발전량의 40%를 육상풍력으로 생산한다면, 2030년까지 배출 695Mt를 감축할 수 있을 것으로 보인다.

덴마크는 일찍이 1980년대부터 풍력 발전에 투자해 온 선두 국가로써, 오늘날 전 세계에서 가장 높은 풍력발전 점유율을 보유하고 있다. 총 전력 생산의 40%가 풍력, 그 중 60%가 육상 풍력으로 이루어진다. 이처럼 덴마크는 풍력 발전을 장려하기 위해 발전차액지원제도(feed-in-tariffs)와 재생에너지 경매와 같은 다양한 정책 방안을 실행했으며, 저탄소 발전 목표를 설정함으로써 투자자들에게 명확한 투자요인을 제공했다.

스웨덴은 풍력 발전에 있어서 지난 십년간 대부분 30%를 웃도는 큰 성장세를 보였다. 녹색 인증제(green certificates)가 도입되면서 많은 풍력 터빈이 건설되었다. 녹색인증제는 시장에서 거래될 수 있고, 풍력 분야 투자를 위한 재정 인센티브를 창출한다.

육상풍력 발전으로 인한 비용 절감은 24\$/tCO<sub>2</sub> 로 예측되는데, 갈수록 풍력 발전 보급률이 높아짐에 따라 통합 비용을 증가시켜 2030년에 비해 2025년 비용 절감이 다소 낮을 것으로 보인다. 2025년에는 총 140억 달러, 2030년 170억 달러까지 비용이 절약된다.

절감 비용	2025	2030
단위 당 절감비용(달러/tCO <sub>2</sub> )	24	24
합계(단위:10억 달러)	14	17

<표2> 육상풍력을 통한 절감 기대 비용

육상풍력은 이외에도 대기오염 방지, 연료 수입의존도 감소, 무역수지 개선, 일자리 창출 등 혜택을 제공한다. 그러나 몇 가지 한계점을 지니는데 첫째로, 풍력 발전을 위한 충분한 풍속을 보유한 국가들이 매우 한정적이라는 점이다. 둘째, 거주지나 자연보호구역과 같이 제한받지 않은 용지가 필요하다. 셋째, 그리드와 반드시 연결되어야 한다. 넷째, 풍력은 매우 가변적인 에너지원 이므로 다른 에너지원과의 적절한 조화가 요구된다. 이를 위해 스웨덴과 덴마크는 모든 시간대의 수요를 충족시키면서 발전량을 조절하기 위해 노르딕 전기 시장(Nordic electricity market)을 통해 다른 에너지원 발전소와 거래

하고 있다. 결국 지리적 요인의 영향을 크게 받는 풍력발전의 특성 상 다양한 지역에 발전 단지를 건설하는 것도 방법이다. 마지막으로, 풍력 터빈이 야생 생물들의 생명을 위협할 수 있다는 것이다. 따라서 철재의 경로와 같은 주요 보호 구역은 최대한 피해서 풍력단지를 조성해야 한다.

### 3) 해상풍력

2014년, 덴마크의 해상풍력 발전량은 5.2TWh를 기록했다. 이는 국내 발전 수요의 14%를 담당하며, 국내 해상풍력 기술 가능성의 5%를 나타낸 정도였다. 2030년까지 OECD 유럽 국가, 북미, 오세아니아, 아시아 국가들이 덴마크 해상풍력 수준의 기술을 마련한다면 전 세계적으로 2025년까지 64TWh, 2030년까지 72TWh의 전기를 생산할 수 있을 것이다. 다시 말하면 이는 2025년과 2030년에 22Mt의 탄소배출을 감축할 수 있다.

덴마크는 풍력발전의 선두국가로, 해상풍력이 풍력발전의 40%를 차지하며 그 점유율은 점차 증가하고 있다. 또한 덴마크 정부는 해상풍력 분야의 민간 참여를 장려하기 위한 대규모 해상풍력단지 상한제 경매를 실시했다. 뿐만 아니라 정부는 그리드 연결을 위한 보증 기금을 조성했다.

비록 해상풍력의 경우 육상풍력보다 비용이 높지만 상대적으로 풍속이 더 빠른 환경에 있으며, 덜 가변적이다. 또한 인구 거주 지역으로부터 거리가 있어 소음 및 경관 피해를 입히지 않을 수 있다는 이점을 지닌다.

반면 육상풍력보다 비용이 비싸다는 점에서 공공 지원이 필요하나 최근 MWh당 60유로 이하로 가격이 폭락하고 있는 추세이다.

### 4) 지열발전

대표적인 지열발전 국가인 아이슬랜드는 국내 총 발전량의 29%를 지열로 생산하고 있다. 지난 십여 년간 열 생산이 상대적으로 안정적이었던 반면, 2001년부터 2013년 사이의 지열 발전 생산은 11%의 성장세를 보였다. 만약 다른 국가들이 이와 같은 성장세를 보인다면 전 세계 지열 발전 생산량은 2025년 60TWh, 2030년 150TWh까지 증가할 것이다. 즉, 2030년까지 지열 발전을 통해 전 세계 탄소 순 배출량의 55Mt 감축을 달성할 수 있다.

지열은 비교적 안정적인 발전원으로서 여타 가변적인 재생에너지원을 보완

할 수 있다. 또한 비교적 적은 토지를 이용하며, 생태계에 큰 영향을 끼치지 않는다는 특징을 지닌다.

아이슬란드는 기존 발전 수단으로 주로 수력을 이용했으나 2000년대 들어 지열발전기술이 크게 확장되었다. 이는 정부의 시추 지원을 위한 저비용 보증 대출 제공 및 프로젝트와 연구 지원 펀딩이 뒷받침되어 가능하였다.

지열발전을 통한 2030년 예측 절감비용은 5.5 달러/tCO<sub>2</sub> 로, 총 3억 4백만 달러의 비용 절감이 가능할 것이다. 또한 대기오염 완화, 연료 수입 감소 및 에너지안보 개선에 기여할 수 있다. 그러나 지열발전은 확실한 투자가 요구되며 장기간을 요하는 발전원이므로 예측 가능한 전력수급계약(Power Purchase Agreement, PPA)을 통해 이익을 보장받을 수 있다.

한편 지하자원의 소유권 관련법이 명확하지 않거나 지상 토지 소유자들이 거부권을 행사한다면, 지열발전소는 법적 장애물을 직면할 가능성이 있다. 따라서 지열 자원 사용을 용이하게 하도록 하는 법적 개혁이 이루어져야 한다.

## 산업 분야 솔루션

### 1) 탄소포집저장(Carbon Capture and Storage, CCS)

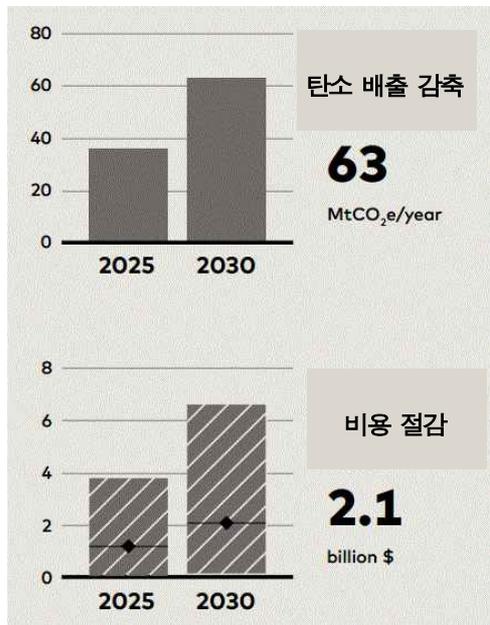
노르웨이는 석유 및 가스 생산 과정에서 대규모로 탄소포집·저장기술(Carbon Capture and Storage, 이하 CCS)을 시작한 선두국가이다. 노르웨이 슬라이프너(Sleipner)와 스노비트(Snovit)의 탄소포집 및 저장 사업은 운영 개시 이후 석유 및 가스 생산에서 배출된 CO<sub>2</sub> 의 90%에 달하는 19Mt의 양을 포집했다.

본 기술은 천연가스 공정 과정 중 분리된 순수 이산화탄소 스트림을 수반하기 때문에 비교적 간단하고 비용효율적(affordable)이다. 따라서 OECD와 중동 중국, 인도, 인도네시아, 말레이시아, 브루나이, 아르헨티나 등 가스 및 석유 생산국에 해당 노르딕 솔루션을 적용시킨다면 2030년까지 평균 63Mt의 탄소 감축이 가능하다는 것을 발견했다.

노르웨이 스타토일(Statoil) 사는 2개의 유전과 가스전을 운영하고 있는데, 이곳에서 천연가스 추출 과정에서 배출되는 탄소를 분리시킨다. 슬라이프너(Sleipner) 탄소포집은 1996년 북해 해상시설에서 시작되었고, 스노비트

(Snovit)는 바렌트 해의 육상 지역에서 2008년 시작되었다. 두 프로젝트의 실시 요인으로는 첫째, 1991년 아이슬란드 내 배출세(emission tax) 도입이다. 1996년 배출세가 35 달러/tCO<sub>2</sub>에 달할 당시 슬라이프너 프로젝트가 시작되었고, 이는 현재 65 달러/tCO<sub>2</sub>까지 증가했다. 둘째, 천연가스 내 CO<sub>2</sub> 함유량에 대한 유럽기준 충족이다.

발전소로부터 배출된 탄소 배출에 CCS기술을 적용하는 것보다 석유 및 가스 생산 과정에서 발생하는 지층 CO<sub>2</sub>를 포집하는 것이 더욱 비용 효율적이다. 슬라이프너 프로젝트를 통한 절감 기대 비용은 33 달러/tCO<sub>2</sub>로, 2030년 전 세계적으로 21억 달러의 비용 절감이 가능해진다.



<그림1> 탄소포집·저장 기술의 탄소배출 감축 및 비용 절감 기대치

한편, CCS 기술 보급의 가장 큰 장애물은 탄소 누출과 안정성에 대한 여론의 우려일 것이다. 이를 위한 관련 기술의 정보 공유가 더욱이 중요성을 띤다. CCS는 상업성이 매우 적기 때문에 정부의 재정 인센티브가 요구된다. 어떤 지역에서는 CO<sub>2</sub> 저장 안정성에 대한 장기적인 모니터링 프레임워크 및 조건이 매우 형편없는 경우가 있다. 지속적인 규제를 통해 투자자들의 예측가능성을 제고하고 인센티브를 확보한다면 CCS 기술을 위한 투자결정 과정이 보다 신속하게 처리될 수 있을 것이다.

## 2) 메탄 저감

천연가스의 주요 요소인 메탄( $\text{CH}_4$ )은 온실가스 중 하나로, 석유 및 가스 탈루성 배출(fugitive emissions)이라고도 불린다. 2000년부터 2010년까지 노르웨이는 석유 및 가스 생산 과정에서 배출되는 메탄량을 국제기준 상 예외적일 정도로 낮은  $2.8\text{kgCH}_4/\text{TJ}$ , 연간 평균 2.3%까지 절감하는 데 성공했다. 여타 석유 가스 생산국들에 노르웨이 메탄 저감 솔루션을 동일하게 적용했을 때 2030년까지 전 세계 배출의  $357\text{MtCO}_2\text{e}$ 까지 감축할 수 있다.

노르웨이 석유·가스 생산은 전 세계에서 가장 낮은 메탄 배출치를 기록하며, 지난 10년 간 전 세계 평균보다 훨씬 안정적인 감소세를 보일 수 있었던 것은 바로 엄격한 안정 규제와 고품질 장비 덕분이었다. 노르웨이의 석유·가스 생산은 육상보다 주로 해상에 위치해있기 때문에 파이프 누출 방지(pipe sealing) 및 장비 지속성이 특히 중요하다.

메탄저감 솔루션을 통해 2030년  $\text{tCO}_2$  당 15달러의 비용절감이 가능하며, 총 51억 달러가 절약될 수 있다.

석유 및 가스 생산에서의 메탄 저감은 회수 가스의 가치 제고를 통해 비용을 절약할 수 있다는 점에서 이로운 반면 이것이 제대로 활용되지 못할 경우가 발생할 수 있다는 점을 고려해야 한다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해 가스 액화와 운송을 위한 파이프라인 및 인프라가 구축되어야 한다.

석유·가스 산업은 높은 재정회수가 가능하지만 메탄저감조치는 상대적으로 회수 가치가 낮기 때문에 인센티브나 규제가 적절하게 이루어지지 않는 한 제대로 장려되지 못할 것이다. 더불어 최근까지도 메탄 누출 방지에 큰 중요성이 부각되지 못한 가운데 미국의 Natural Gas STAR와 같은 정부 프로그램은 메탄 저감을 위한 인식 제고와 이행 독려에 효과적일 수 있다.

## 3) 저탄소에너지

핀란드와 스웨덴의 펄프 및 제지산업은 세계에서 가장 높은 바이오에너지 점유율을 보이고 있어 매우 낮은 양의 탄소를 배출하고 있다. 전 세계 관련 산업 평균 배출량이  $35\text{tCO}_2/\text{TJ}$ 인 데 반해 핀란드는  $14\text{tCO}_2/\text{TJ}$ , 스웨덴은  $4\text{tCO}_2/\text{TJ}$ 를 기록하고 있다. OECD 국가 또는 비 OECD 국가에 핀란드 모델을 적용했을 때의 탄소 배출 감축 기대치는 다음과 같다.

	2025			2030		
	최소	보통	최대	최소	보통	최대
OECD	6	9	12	11	16	21
비 OECD		24			41	
합계	31	34	37	52	57	63

**<표3> 핀란드 저탄소에너지 모델 적용 시 OECD와 비OECD 국가에서의 배출 감축치 (단위 : MtCO<sub>2</sub>e)**

위에서 언급한 바와 같이, 노르딕 국가의 펄프 및 제지 산업은 목재와 같은 주 원료 잔류물이나 폐기물을 활용하여 바이오매스 에너지를 사용함으로써 관련 산업 OECD 평균 3분의 2, 전 세계 3분의 1에서 2분의 1정도로 매우 낮은 수준의 배출량을 보였다.

노르딕 국가에서는 석유과동 이후 관련 산업계의 탈석유의 움직임이 시작되었고, 공장들은 폐기물을 하수에 방출하는 대신 소각을 통해 환경오염을 최소화시켰다. 스웨덴의 경우 재생에너지 발전 녹색 인증제(green certificates)를 실시함으로써 투자를 독려했다.

산업계의 저탄소 에너지를 통한 비용 절감은 지역 환경에 따라 매우 다양할 수 있다. 본 연구에서 화학 산업 내 바이오매스의 석탄 대체와 신건물 건설 및 레트로피트를 총체적으로 고려했을 때 기대되는 절감 비용은 tCO<sub>2</sub> 당 23달러이며, 2030년 총 13억 1천여 달러가 절약될 수 있다. 더 나아가 산업계 저탄소 에너지화, 즉 바이오에너지 산업을 통해 연료 수입 의존도를 낮추고, 에너지 안보를 보장하며 지역 일자리를 창출할 수 있다.

그러나 목재와 같은 바이오매스 원료를 풍부하게 가지고 있지 않은 국가들의 경우, 원료 수입에 따른 비용 증가와 지속가능성에 대한 의문이 계속해서 제기될 수 있다. 역설적으로 증가하는 재활용률이 목재 폐기물량을 감소시켜 바이오매스의 사용을 어렵게 만든다는 쟁점 역시 존재한다.

※ 동 보고서는 요약 및 번역본입니다. 상세 내용은 원문을 참조하십시오. 원문은 <https://www.sitra.fi/en/publications/nordic-green-to-scale/> (원문 - Nordic Green to Scale )에 게재되어 있습니다.

## 해외발간보고서 요약분석

---

### 노르딕 국가의 그린 솔루션 I

발행일 : 2017년 4월 10일

발행처 : 한국환경산업기술원

---